

引文格式:周金枝,吴 学,钟楚珩,等. 基于改进 MGM(1,1)模型的再生混凝土疲劳寿命预测[J]. 建筑科学与工程学报,2024,41(2):31-38.  
ZHOU Jinzhi, WU Xue, ZHONG Chuheng, et al. Fatigue life prediction of recycled concrete based on improved MGM (1,1) model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 31-38.

DOI:10.19815/j.jace.2022.08052

# 基于改进 MGM(1,1)模型的再生混凝土疲劳寿命预测

周金枝<sup>1,2</sup>, 吴 学<sup>1,3</sup>, 钟楚珩<sup>1</sup>, 石赐明<sup>1</sup>, 施佳楠<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034; 3. 中建三局集团(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**准确预测再生混凝土(RC)疲劳寿命对其应用于路面及桥梁等项目具有重要意义。在灰色马尔科夫模型(MGM)的基础上,引入新陈代谢理论不断更新原始数列中的疲劳寿命数据,并结合粒子群算法优化状态区间的取值,提高其预测精度以适应混凝土疲劳寿命预测,再以不同应力水平的 RC 疲劳寿命试验结果作为原始数据,建立了基于改进的灰色马尔科夫模型的 RC 疲劳寿命预测模型,并对改进前后模型的精度以及预测结果进行对比分析。结果表明:RC 疲劳寿命  $N$  服从两参数威布尔分布;将预测值从  $\lg(N)$  转化为疲劳寿命后进行误差分析可知,应力-疲劳寿命( $S-N$ )曲线的预测精度较低,最大相对误差达到 201.43%;MGM(1,1)模型相比于  $S-N$  曲线预测精度有所提升,但平均相对误差仍达到 102.20%;经两种算法理论改进后的 MGM(1,1)模型预测精度有较大的提高,平均相对误差仅为 5.62%;引入其他文献试验数据进行验证并与原文献中模型进行对比分析发现,改进 MGM(1,1)模型的误差波动幅度小且平均误差小于原文献中模型,平均相对误差仅为 1.01%,说明改进的 MGM(1,1)模型在对 RC 疲劳寿命预测上具有更高的精确度与可靠性。

**关键词:**再生混凝土;灰色理论;马尔科夫模型;新陈代谢理论;粒子群算法;疲劳寿命

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)02-0031-08

## Fatigue life prediction of recycled concrete based on improved MGM (1,1) model

ZHOU Jinzhi<sup>1,2</sup>, WU Xue<sup>1,3</sup>, ZHONG Chuheng<sup>1</sup>, SHI Ciming<sup>1</sup>, SHI Jianan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Structure Health and Safety, Hubei University of Technology, Wuhan 430034, Hubei, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Group (Shenzhen) Co., Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** Accurate prediction of the fatigue life of recycled concrete (RC) is important for the application of RC in pavements and bridges and other projects. Based on the grey Markov model (MGM), the fatigue life data in the original series were continuously updated by using the metabolic theory, and combined with the particle swarm algorithm to optimize the value of the

收稿日期:2023-08-16

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHSL19-04-KF);湖北省教研项目(2017314);

湖北工业大学博士启动基金项目(BSQD2020051)

作者简介:周金枝(1964-),女,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:hgzhongzhou@126.com。

通信作者:钟楚珩(1989-),男,工学博士,讲师,E-mail:chuheng.zhong@hbut.edu.cn。

state interval to improve its prediction accuracy for concrete fatigue life prediction. Then the fatigue life test results of RC with different stress levels were used as the original data to establish the fatigue life prediction model of RC based on the improved gray Markov model, and the accuracy of the model and the prediction results before and after improvement were compared and analyzed. The results show that the RC fatigue life  $N$  obeys the two-parameter Weibull distribution. The error analysis after converting the predicted values from  $\lg(N)$  to fatigue life shows that the prediction accuracy of the stress-fatigue life ( $S-N$ ) curve is low, with maximum relative error of 201.43%. The prediction accuracy of the MGM(1,1) model is improved compared with that of the  $S-N$  curve, but the average relative error still reaches 102.20%. The prediction accuracy of the MGM(1,1) model improved by the theoretical improvement of both algorithms has improved considerably, and the average relative error is only 5.62%. The improved MGM(1,1) model is found to have smaller error fluctuations and smaller mean errors than the model in the literature when the experimental data from other literature are introduced for validation and comparative analysis with the model in the literature, and the average relative error is only 1.01%, indicating that the improved MGM(1,1) model has higher accuracy and reliability in predicting the fatigue life of RC.

**Key words:** recycled concrete; grey theory; Markov model; metabolic theory; particle swarm algorithm; fatigue life

**Author resumes:** ZHOU Jinzhi(1964-), female, PhD, professor, E-mail: hgzhzhouzhou@126.com;

ZHONG Chuheng(1989-), male, PhD, assistant professor, E-mail: chuheng.zhong@hbut.edu.cn.

## 0 引言

基于可持续发展的理念,再生混凝土(RC)应运而生,以实现建筑废弃物的资源化再利用。RC不仅改善了建筑垃圾对环境造成的污染问题<sup>[1]</sup>,而且通过减少天然骨料的提取,间接减少了CO<sub>2</sub>的排放,经济和环境效益显著。为保证RC在承受重复荷载作用的实际工程应用中的可靠性与安全性,需要对其疲劳性能<sup>[2]</sup>展开研究。疲劳寿命作为混凝土疲劳性能的重要表征,一直是研究热点,而疲劳寿命预测对于了解混凝土的疲劳失效具有重要意义。一般来说,疲劳寿命可以根据应力-疲劳寿命( $S-N$ )曲线<sup>[3-6]</sup>进行估算。 $S-N$ 曲线的生成需要大量疲劳试验的数据,而低应力水平的疲劳试验将是一个漫长且复杂的过程。因此,需要开发一种利用少量试验数据就能准确预测混凝土疲劳寿命的方法。

由于灰色系统理论<sup>[7-8]</sup>可以针对“小样本”、“贫信息”的数据进行科学的预测,因此开始广泛运用于混凝土研究之中。高鑫等<sup>[9]</sup>利用GM(1,1)模型对应力损伤轻骨料混凝土的冻融寿命进行预测,并与修正的Loland混凝土损伤模型预测结果进行了对比分析,结果表明GM(1,1)模型的预测精度更高。侯永利等<sup>[10]</sup>在GM(1,1)模型的基础上,对原始差

分(ODGM)、均值(EGM)、均值差分(EDGM)、离散(DGM)4种形式建立的预测模型进行比较分析,结果发现ODGM模型存在预测激进的偏差,不建议采用该模型对BFRC的冻融寿命进行预测。刘永连等<sup>[11]</sup>利用自回归模型对灰色预测模型进行改进,使其更为准确地预测混凝土弯曲疲劳强度。杨军平等<sup>[12]</sup>为了准确预测高强混凝土强度,将灰色模型与马尔科夫链结合,提出基于改进的非线性伯努利灰色马尔科夫组合预测模型。Zhu等<sup>[13]</sup>通过粒子群算法(PSO)来改进灰色马尔科夫模型(MGM)对混凝土的疲劳寿命进行预测,发现改进后的模型精确度显著提高。

本文在灰色马尔科夫模型(MGM)的基础上,引入新陈代谢理论和粒子群算法对MGM(1,1)模型进行改进,并利用不同应力水平下RC疲劳寿命实测数据建立基于改进的MGM(1,1)模型的RC疲劳寿命预测模型,通过对比改进前后模型的预测精度来证明模型的有效性,以供工程实际应用。

## 1 试验方法

### 1.1 试验原材料及配合比

采用P.O42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰,细度为9.80%;天然粗骨料为5~20 mm

粒径的石灰岩碎石,再生粗骨料由废弃混凝土制成,细骨料为江砂,细度模数为 2.65;减水剂为聚羧酸  
粒径为 5~20 mm,粗骨料的基本性能见表 1;天然减水剂,减水率为 25%。

表 1 粗骨料性质

Table 1 Properties of coarse aggregate

骨料类型	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	针片状含量/%	压碎指标/%	吸水率/%	含泥量/%
天然骨料	2 695	1.45	3.92	0.92	0.43
再生骨料	2 669	2.90	11.00	3.60	0.40

RC 配合比设计目标为 C40,取代率为 30%,采用等质量取代,配合比设计如表 2 所示。抗压试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,共配置 3 块,弯曲抗折试验和抗折疲劳试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件,共配置 32 根,其中 4 根测定 28 d 龄期的抗折强度,另外 28 根进行 7 种应力水平的弯曲疲劳试验,试验根据相关试验标准<sup>[14]</sup>进行。

表 2 混凝土配合比及基本力学性能

Table 2 Mix proportion and basic mechanical properties of concrete

各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
水泥	粉煤灰	天然粗骨料	再生粗骨料	中砂	水	减水剂		
273	117	766	329	700	160	2	42.65	5.43

1.2 疲劳试验

疲劳试验如图 1 所示,荷载采用正弦波形,等应力控制加载,加载频率为 10 Hz。试验设定 7 个应力水平(0.55、0.60、0.65、0.70、0.75、0.80、0.85),应力比为 0.1。试件出现断裂或疲劳加载次数超过 2×10<sup>6</sup> 次后立即停止试验,此时的加载次数即为疲劳寿命,试验结果见表 3。



图 1 四点弯曲疲劳试验

Fig. 1 Four-point bending fatigue test

2 疲劳寿命分析

2.1 两参数威布尔分布检验

关于混凝土疲劳寿命分析,多数学者采用对数正态分布<sup>[15]</sup>和威布尔分布<sup>[16]</sup>,本文选用两参数威布尔分布对 RC 进行疲劳寿命分析,两参数威布尔分布可表示为

$$\ln[\ln(1/P)]=b\ln(N)-b\ln(N_a) \tag{1}$$

式中: $P$  为疲劳寿命  $N$  时的存活概率; $b$  为形状参数; $N_a$  为特征疲劳寿命参数。

某给定应力水平下 RC 疲劳寿命所对应的存活概率  $P$  为

$$P=\frac{i}{K+1} \tag{2}$$

式中: $i$  为不同应力水平下的试验样本序号; $K$  为不同应力水平下的试验样本总数。

令  $Y=\ln[\ln(1/P)]$ ,  $X=\ln(N)$ ,  $c=b\ln(N_a)$ ,得

$$Y=bX-c \tag{3}$$

式(3)为直线方程,可通过线性拟合求出威布尔分布的未知参数,同时式(3)还可以检验给定应力水平下 RC 疲劳寿命是否服从威布尔分布。不同应力水平下 RC 疲劳寿命的线性回归曲线如图 2 所示。由图 2 可知,不同应力水平下 RC 疲劳寿命具有良好的线性关系,决定系数  $R^2$  均大于 0.85,可认为用两参数威布尔分布来描述 RC 疲劳寿命是较为可靠的。此外,不同应力水平下的形状参数大部分小于 3.7,其中形状参数越大,混凝土疲劳寿命离散性越小,由此可见 RC 疲劳寿命离散性较大,这是因为再生骨料的掺入增大了 RC 细观层次上的多相性与不均匀性,使得 RC 疲劳寿命离散性增大。

2.2 S-N 曲线

通过建立 S-N 曲线可对混凝土疲劳寿命进行预测,本文采用双对数疲劳方程描述 S-N 曲线,即

$$\lg(S)=A+B\lg(N) \tag{4}$$

将表 3 中 0.55~0.75 应力水平的  $\lg(N)$  值代入式(4)可得到 RC 的 S-N 曲线,如图 3 所示。由

表 3 疲劳试验结果  
Table 3 Results of fatigue tests

应力水平	疲劳寿命				疲劳寿命均值	lg(N)均值
0.55	1 589 875	1 889 745	1 957 462	2 000 000	1 859 271	6.267 6
0.60	657 436	757 466	982 576	1 205 869	900 837	5.942 7
0.65	264 562	389 746	461 478	521 475	409 315	5.598 7
0.70	52 580	89 884	120 204	163 674	106 586	4.992 1
0.75	6 784	8 476	10 721	12 823	9 701	3.974 5
0.80	983	1 247	2 574	3 476	2 070	3.260 0
0.85	394	471	574	858	574	2.740 2

注:试件疲劳寿命超过  $2\times 10^6$  次记  $2\times 10^6$  次。

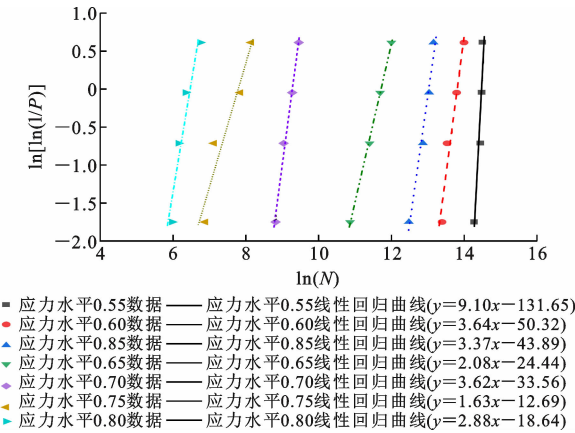


图 2 RC 疲劳寿命威布尔分布检验

Fig. 2 Weibull distribution test of RC fatigue life

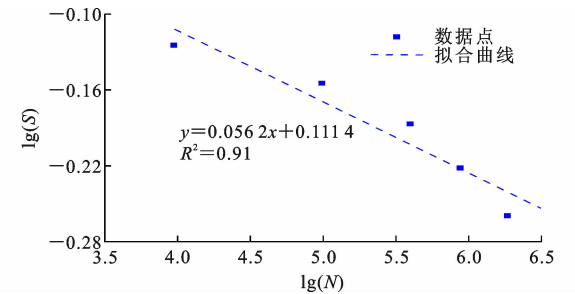


图 3 RC 的 S-N 曲线

Fig. 3 S-N curve of RC

图 3 可知,随着应力水平的增大,RC 疲劳寿命下降速度加快,这是由于应力水平越大,RC 内部的裂缝扩展就越快,最终加速 RC 失效破坏。通过建立的疲劳方程可求得 0.80 和 0.85 应力水平的预测值分别为 3.706 6 和 3.238 1。将预测值与实际值进行误差分析可知,其最大相对误差达到 18.17%,说明 S-N 曲线预测效果较差,可为工程应用提供相应参考但预测精度欠佳。

3 预测模型的构建与改进

3.1 灰色马尔科夫模型

灰色模型<sup>[17-18]</sup>将一个随机过程视为灰色过程,

其中灰色过程是随机的、波动的,但也是有序的、有界的,具有潜在的规律。灰色模型可利用这一潜在规律建立数学模型,进而实现对试验对象的预测。然而,灰色模型一般仅适用于时间序列短、数据相对稳定的对象,而对于预测波动幅度大且乱序的对象具有一定的局限性。马尔科夫链预测本质上属于随机过程,其对事件发生可能性概率的预测是依据事件的状态转移矩阵和当前状态,进而对未来可能发生事件的概率进行预测,对预测波动性较大的事件具有良好的实用性<sup>[19-20]</sup>。因此,本文在灰色模型预测的基础上借助马尔科夫链进行优化计算,并以此建立灰色马尔科夫模型。

3.2 新陈代谢灰色马尔科夫模型

随着疲劳加载时间增加,在外部环境的变化及人为因素的影响下,试验数据发生改变甚至突变,这会导致建立的灰色模型随着时间推移变得不再符合原有试验的发展规律。因此,需要建立一种随时间变化而不断更新的预测模型,也就是减小旧的原始数据对模型的影响。依据新陈代谢理论自我更新和调节的原理,本文将其与灰色预测模型相结合,将原始序列中最旧的一个数据去除并新增预测产生的新数据,从而维持数据列的长度不变,以此建立新陈代谢 GM(1,1)预测模型。

新陈代谢理论 GM(1,1)预测模型的具体构建方式为:将灰色模型的预测值  $\hat{x}^{(0)}(n+1)$  融入原始序列中,同时删除  $x^{(0)}(1)$ ,从而得到新序列  $X^{(0)}=[x^{(0)}(2),x^{(0)}(3),\cdots,x^{(0)}(n),\hat{x}^{(0)}(n+1)]$ ,以此类推,在维持序列长度不变的前提下不断更新序列,进而获得一系列预测数据,再通过马尔科夫链进一步优化计算,由此建立新陈代谢灰色马尔科夫模型(XMGM)。

3.3 粒子群灰色马尔科夫模型

灰色马尔科夫模型在进行预测时都是取状态区间的中间值,但是在具体的应用过程中,中间值不具

有普适性且误差较大。因此,为了取得状态区间最优值,将每个状态区间看作为一个灰区间,对这种灰区间进行参数优化的方法为

$$z_i=\lambda_iL_i+(1-\lambda_i)H_i \tag{5}$$

式中: $z_i$  为第  $i$  个状态区间的最优值; $\lambda_i$  为白化因子,且  $\lambda_i \in [0,1]$ ;  $L_i$ 、 $H_i$  分别为第  $i$  个状态区间的上下边界值。

粒子群算法具有规则简单、易于实现和较强寻优能力的优点,因此选取粒子群算法优化计算出灰色马尔科夫模型中灰区间的最优白化因子,进而建立粒子群灰色马尔科夫模型(PMGM)。粒子群算法是用于连续优化的基础群体的随机算法,该算法的灵感来源于鸟群的社群行为,是由 Kennedy 等<sup>[21]</sup>提出,具有较好的通用性和鲁棒性。在粒子群算法中,每只鸟在解空间中被抽象为粒子,粒子的位置就是优化问题的解。每个粒子都有一定的飞行速度和方向,粒子性能的好坏取决于待优化问题的目标函数确定的适应度函数值。在对最优解的寻找过程中,粒子可以通过公式(6)、(7)更新自身的位置和速度<sup>[22-23]</sup>。

$$v_i(t+1)=\omega v_i+c_1r_1[x_{pbest_i}-x(t)]+c_2r_2[x_{gbest_i}-x_i(t)] \tag{6}$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1) \tag{7}$$

$$\omega=\frac{1}{1+1.5t/m} \tag{8}$$

式中: $x_i$  为粒子在  $t$  时刻的位置; $v_i$  为粒子在  $t$  时刻的速度; $x_{pbest_i}$  为粒子自身搜寻到的最优位置; $x_{gbest_i}$  为整个种群迄今所搜寻到的最优位置; $r_1$ 、 $r_2$  均为  $(0,1)$  的随机数; $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子; $\omega$  为惯性因子; $m$  为最大迭代次数; $t$  为当前迭代次数。

本文中每个粒子的适应度函数使用式(9)进行衡量。

$$f=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^ne^2(i) \tag{9}$$

式中: $e^2(i)$  为各预测值误差平方。

粒子群算法流程步骤如图 4 所示。

3.4 新陈代谢粒子群灰色马尔科夫模型

新陈代谢粒子群灰色马尔科夫模型(XPMGM)综合了以上两种模型的改进思路,即采用新陈代谢理论不断更新原始数据,同时通过粒子群算法优化区间状态取值,以此改良灰色理论与马尔科夫链所存在的不足之处。

粒子群算法中,粒子长度由待解决问题的困难程度所决定;粒子个数影响着算法的搜索能力,数量

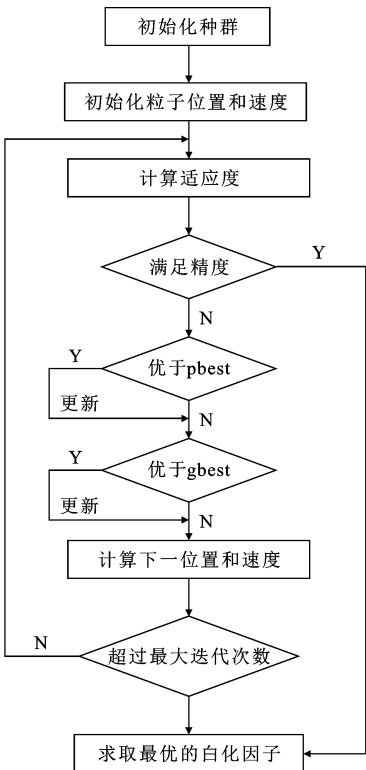


图 4 粒子群算法流程图

Fig. 4 Particle swarm algorithm flow chart

较大运算时间过长,数量较小收敛过快,精度较低;粒子飞行速度影响着算法的寻优范围,一般按照求解精度设定;迭代次数与算法收敛精度有关,需反复测试得出;学习因子的作用是提高算法收敛速度,避免算法陷入早熟收敛,通常取 2.0。综合以上考量因素,经测试后得出粒子群算法中各参数值如表 4 所示。运用 MATLAB\_R2018a 编制粒子群算法优化程序,辅助求解得出 3 个白化因子分别为 0.25、0.18、0,进而得到预测模型的结果。

表 4 粒子群算法相关参数

Table 4 Related parameters of particle swarm optimization algorithm

粒子长度	粒子个数	粒子飞行速度范围	迭代次数	学习因子
3	500	-0.01~0.01	1 000	2

3.5 不同预测模型的对比分析

将应力水平 0.55~0.75 的 5 个  $\lg(N)$  值作为预测模型的原始数据,其余的数据作为测试数据。图 5 为不同预测模型的预测结果与试验值对比。从图 5 可以看出:在作为原始数据的部分,不同预测模型的预测结果相差不大,均与试验值十分吻合,其中同时采用两种算法理论进行改进的预测模型效果最佳;在作为测试数据的部分,不同预测模型的预测结果差距较大,MGM(1,1)模型的预测结果与试验值

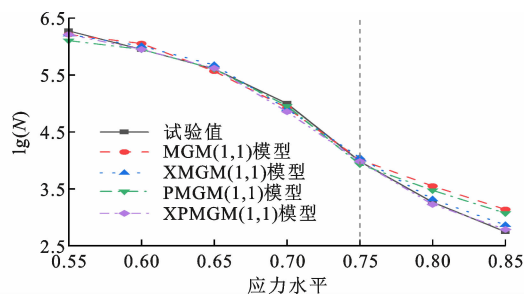


图 5 不同模型的预测结果与试验值对比

Fig. 5 Comparison of prediction results and experimental values of different models

偏差最为明显,单独采用新陈代谢理论进行改进的预测模型优于单独采用粒子群算法的模型,并且两者都优于 MGM(1,1)模型,而 XPMGM(1,1)模型在 XMGM(1,1)模型的基础上效果进一步提升,与试验值几乎一致,说明采用新陈代谢理论与粒子群算法对 MGM(1,1)模型进行改进是有效的,且 XPMGM(1,1)模型能更好地适用于 RC 疲劳寿命预测。图 6 为不同预测模型的预测结果误差对比。由图 6 可知,不同预测模型的预测结果误差存在波动现象,但波动幅度不同,波动幅度由大到小依次为 MGM、PMGM、XMGM、XPMGM,表明 XPMGM(1,1)模型的误差波动幅度最小,也进一步验证了上述结论。

针对 RC 疲劳寿命预测,本文进一步将不同预测模型的预测值从  $\lg(N)$  值转化为真实的疲劳寿命并与  $S-N$  曲线的预测值进行对比分析,不同预测模型的误差对比如表 5 所示。由表 5 可知,使用传统  $S-N$  曲线对 RC 疲劳寿命进行预测的结果误差较大,其最大相对误差达到 201.43%,不具备应用价值。MGM(1,1)模型利用了马尔科夫链的无后效

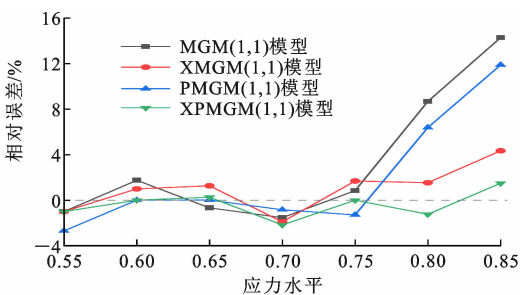


图 6 不同模型的预测结果相对误差对比

Fig. 6 Relative error comparison of prediction results of different models

性,只与它预测的紧前状态有关,因此 MGM(1,1)模型预测值的误差与  $S-N$  曲线相比有较大提升,但平均相对误差仍达到 77.88%,处于不可接受范围内。XMGM(1,1)模型通过不断的数据更新,减小旧的数据对现在预测产生的影响,进而提高预测精度,其平均相对误差为 16.57%,相比 MGM(1,1)模型有较大提升;PMGM(1,1)模型中粒子群算法只能获取状态区间最优解,不能减小原始数据对预测的影响,因而其预测精度相比 MGM(1,1)模型提升有限,平均相对误差仍达到 72.30%。XPMGM(1,1)模型综合了两种算法理论的优点,使其预测值的平均相对误差最小,平均相对误差仅为 5.62%,说明 XPMGM(1,1)模型在预测 RC 疲劳寿命上具有更高的精确度与可靠性。

为了进一步验证本文模型的有效性,引入文献[13]的数据进行验证并与文献[13]模型的预测结果进行比较,结果如图 7 所示。由图 7 可知,文献[13]模型和 XPMGM(1,1)模型的预测值都与原始疲劳试验数据拟合较好,不过 XPMGM(1,1)模型在不同应力循环过程中预测值的误差都较小且随应力水

表 5 不同模型的预测结果误差对比

Table 5 Error comparison of prediction results of different models

模型	应力水平	lg(N)			疲劳寿命		
		均值	预测值	相对误差/%	均值	预测值	相对误差/%
S-N 曲线	0.80	3.260 0	3.706 6	13.70	2 070	5 089	145.83
	0.85	2.740 2	3.238 1	18.17	574	1 730	201.43
MGM(1,1)	0.80	3.260 0	3.542 6	8.67	2 070	3 489	68.53
	0.85	2.740 2	3.131 6	14.28	574	1 354	135.87
XMGM(1,1)	0.80	3.260 0	3.346 1	2.64	2 070	2 219	71.80
	0.85	2.74 02	2.859 1	4.34	574	723	25.95
PMGM(1,1)	0.80	3.260 0	3.468 1	6.38	2 070	2 938	41.94
	0.85	2.740 2	3.065 7	11.88	574	1 163	102.65
XPMGM(1,1)	0.80	3.260 0	3.289 0	0.89	2 070	1 945	-6.03
	0.85	2.740 2	2.781 0	1.49	574	604	5.21



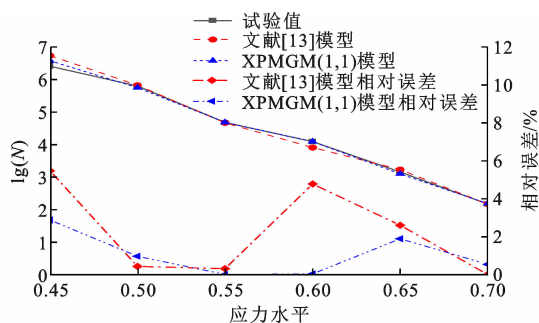


图7 不同模型的预测精度比较

Fig. 7 Comparison of prediction accuracy of different models

平变化不大,平均相对误差仅为 1.01%,小于文献[13]模型的平均相对误差 2.11%,说明 XPMGM(1,1)模型相比文献[13]模型提高了精确度,也进一步验证了 XPMGM(1,1)模型在预测混凝土疲劳寿命上的优越性。

上述分析中,本文通过对模型改进前后的纵向对比和模型间的横向对比证明了 XPMGM(1,1)能较为精确地预测混凝土在不同应力水平下的疲劳寿命,可为再生混凝土在路面及桥梁等项目提供理论依据与技术支持。

## 4 结 语

(1)RC 疲劳寿命服从两参数威布尔分布;随着应力水平的增大,RC 疲劳寿命逐渐下降;使用  $S-N$  曲线对 RC 疲劳寿命进行预测的精度较低,其最大相对误差达到 18.17%。

(2)XPMGM(1,1)模型在预测 RC 疲劳寿命上效果最好,其预测值与试验值最为吻合;将预测值转化为疲劳寿命后与试验值进行对比分析可知,传统  $S-N$  曲线的预测精度较差;MGM(1,1)模型预测结果相比  $S-N$  曲线有较大提升,但误差仍然较大,不足以作为理论模型进行应用;XMGM(1,1)模型和 PMGM(1,1)模型在 GM(1,1)模型的基础上,其预测精度有一定的提升,其中 XMGM(1,1)模型提升幅度大于 PMGM(1,1)模型;XPMGM(1,1)模型综合了两种算法理论的优点,使其预测值的平均误差最小,平均相对误差仅为 5.62%,说明 XPMGM(1,1)模型在预测 RC 疲劳寿命上具有更高的精确度与可靠性。

(3)通过引入其他文献的数据进行横向比较分析可知,原文献中模型和 XPMGM(1,1)模型的预测值都与原始疲劳试验数据拟合较好,不过 XPMGM(1,1)模型平均相对误差小于原文献中模

型,平均相对误差仅为 1.01%,说明 XPMGM(1,1)模型相比原文献中模型提高了精确度,也进一步验证了 XPMGM(1,1)模型在预测混凝土疲劳寿命上的优越性。

## 参考文献:

### References:

- [1] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures [M]. Berlin: Springer, 2018.
- [2] 肖建庄,李 宏. 再生混凝土单轴受压疲劳性能[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 62-69.  
XIAO Jianzhuang, LI Hong. Investigation on the fatigue behavior of recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 62-69.
- [3] 侯永利,俞正兴,周磊磊,等. 玄武岩纤维再生混凝土冻融后的弯曲疲劳特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 15(8): 69-76.  
HOU Yongli, YU Zhengxin, ZHOU Leilei, et al. Bending fatigue characteristics of frozen-thawed basalt fiber recycled concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 15(8): 69-76.
- [4] 寇佳亮,张亚茹,张 晶. 冻融循环后高延性混凝土疲劳性能试验及  $S-N$  曲线研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(5): 75-85.  
KOU Jialiang, ZHANG Yaru, ZHANG Jing. Experimental study on fatigue property and  $S-N$  curve of high ductile fiber concrete under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(5): 75-85.
- [5] MIURA T, SATO K, NAKAMURA H. Influence of primary cracks on static and fatigue compressive behavior of concrete under water [J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124755.
- [6] TAN Y, ZHOU C X, ZHOU J Z. Influence of the steel fiber content on the flexural fatigue behavior of recycled aggregate concrete [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8839271.
- [7] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 2017.  
LIU Sifeng. Grey system theory and its application [M]. 8th ed. Beijing: Science Press, 2017.
- [8] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.  
DENG Julong. Course of grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1990.
- [9] 高 鑫,孔祥振,申向东. 基于 GM(1,1)的应力损伤

- 轻骨料混凝土抗冻性评估[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 184-190.
- GAO Chu, KONG Xiangzhen, SHEN Xiangdong. Freeze-thaw resistance evaluation of lightweight aggregate concrete with stress damage based on GM(1,1) [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 184-190.
- [10] 侯永利, 吕东朔, 周磊磊, 等. 基于抗冻性指标的玄武岩纤维再生混凝土的寿命预测[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12084-12089, 12094.
- HOU Yongli, LYU Dongshuo, ZHOU Leilei, et al. Life prediction of basalt fiber recycled concrete based on frost resistance index [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12084-12089, 12094.
- [11] 刘永连, 卢哲安, 袁晓辉, 等. 灰色自回归模型对碳纤维混凝土弯曲疲劳强度的预测[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(8): 48-50.
- LIU Yonglian, LU Zhean, YUAN Xiaohui, et al. Prediction of gray-autoregressive model on bending fatigue strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) [J]. China Concrete and Cement Products, 2013(8): 48-50.
- [12] 杨军平, 马 勇. 改进的非线性灰色伯努利马尔科夫模型预测高强度混凝土强度[J]. 混凝土, 2017(2): 42-45, 49.
- YANG Junping, MA Yong. Strength of high strength concrete forecast based on the improved nonlinear grey Bernoulli-Markov forecasting model [J]. Concrete, 2017(2): 42-45, 49.
- [13] ZHU C, YANG W B, WANG H L. Fatigue life prognosis of concrete using extended grey Markov model [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 1225-1228.
- [14] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [15] ZHOU J Z, FU T T, ZHONG C H, et al. Flexural fatigue behaviors of silicon carbide recycled concrete in corrosive environments [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 7459777.
- [16] SAINI B S, SINGH S P. Flexural fatigue life analysis of self compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119176.
- [17] 霍俊芳, 慈天义, 郝负洪, 等. 集料增强粉煤灰泡沫混凝土性能试验研究与模型预测[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 40(4): 33-40.
- HUO Junfang, CI Tianyi, HAO Fuhong, et al. Experimental study and model prediction of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 40(4): 33-40.
- [18] 何晓雁, 周 曜, 刘平源, 等. 基于灰色理论的 CBC 单面冻融后抗压强度与孔结构参数关系研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 1-9.
- HE Xiaoyan, ZHOU Yao, LIU Pingyuan, et al. Relationship between compressive strength and pore structure of CBC after single side freeze-thaw based on grey theory [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 1-9.
- [19] YU B Y, SUN Z G, QI L. Freeze-thaw splitting strength analysis of PAC based on the gray-Markov model [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 9954504.
- [20] CUI H R, WU R R, ZHAO T. Decomposition and forecasting of CO<sub>2</sub> emissions in China's power sector based on STIRPAT model with selected PLS model and a novel hybrid PLS-grey-Markov model [J]. Energies, 2018, 11(11): 2985.
- [21] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'95). Perth: IEEE, 2002: 1942-1948.
- [22] 赵 毅. 粒子群优化算法的改进和应用研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- ZHAO Yi. Research on improvement and application of particle swarm optimization [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [23] 马全党, 江福才, 范庆波, 等. PSO-无偏灰色马尔科夫模型在船舶交通流量预测中的应用[J]. 中国航海, 2019, 42(1): 97-103.
- MA Quandang, JIANG Fucui, FAN Qingbo, et al. Application of PSO-unbiased grey Markov model in ship traffic flow prediction [J]. Navigation of China, 2019, 42(1): 97-103.